

# 暂态稳定分析

## Transient Stability Analysis

张天野

2019 年 4 月 14 日

## 1 问题背景

### 1.1 电力系统

电力系统可以分为电力供应 (Power Generation)、电力传输 (Power Transmission)、电力分配 (Power Distribution) 这三个子系统。

**电力供应 (Power Generation).** 发电机为电力供应子系统的主体部分，为整个电网提供电能。

**电力传输 (Power Transmission).** 电力系统中通过线路（直流线、交流线）来实现电能的传输。母线则可以看做用来汇聚多条线路的节点。

**电力分配 (Power Distribution).** 电力分配是指对负荷供电的电能分配。

### 1.2 电力系统稳定

电力系统稳定问题的两种权威定义如下：

**定义 I. (1994 年, kundur)** 电力系统稳定是指电力系统在发生扰动 (disturbance) 后，能够继续保持平衡的运行状态 (equilibrium state) 或能够到达一个新的平衡状态的能力 [4]。

**定义 II. (2004 年, kundur with IEEE/CIGRE)** 电力系统稳定是指，给定一个电力系统及其初始运行状态，使其在受到物理扰动后重新回到平衡运行状态的能力。此处，平衡状态的要求是，绝大多数系统变量仍保持有界性，整个电力系统在实际使用时也保持完整状态 [5]。

如图 1 (a)，根据 IEEE/CIGRE 的释义，电力系统稳定可以根据其稳定特征、扰动大小、时间尺度分为三大类：功角稳定、频率稳定和电压稳定 1。功角描述的是电力系统中发电机的运行状态，频率和电压描述的是母线。因此，功角稳定描述的是电力供应子系统的稳定；频率、电压稳定描述的是电力分配、传输子系统的稳定。图 1(b) 是对图 1 (a) 更为详细的描述。

### 1.3 暂态稳定

**定义 (暂态稳定).** 暂态稳定是指，电力系统在遭受强烈扰动后仍保持同步的能力。这里说的同步指的是发电机之间的同步。功角其实是发电机自身的属性，而判断功角稳定的标准是发电机之间的功角差，这就是发电机的同步问题。

由图 1 知，暂态稳定是功角稳定的一个分支，因此暂态稳定重点关注功角（发电机），但同时也关注频率、电压（发电机、母线、负荷等）。因此，暂态稳定约等于电力系统稳定，暂态稳定的研究内容为电力系统稳定的研究内容，暂态稳定与电力系统稳定的最主要区别在于，暂态稳定研究的是收到大扰动（而不是小扰动）后的电网稳定性。**备注：李工是这么说的，但是我觉得跟图 1 和上述定义看起来有些矛盾。**

**定义 (暂态稳定仿真).** 暂态稳定仿真是指，在给定的电力系统及其初始运行状态的基础上，在某个时刻给电力系统中的某个/某几个元件（交流线、变压器等）施加一个故障，并指定故障清除的时间和仿真时长。仿真程序通过给定的故障条件，模拟电力系统在发生故障后各元件上的各电气量在仿真时长内的变化情况。

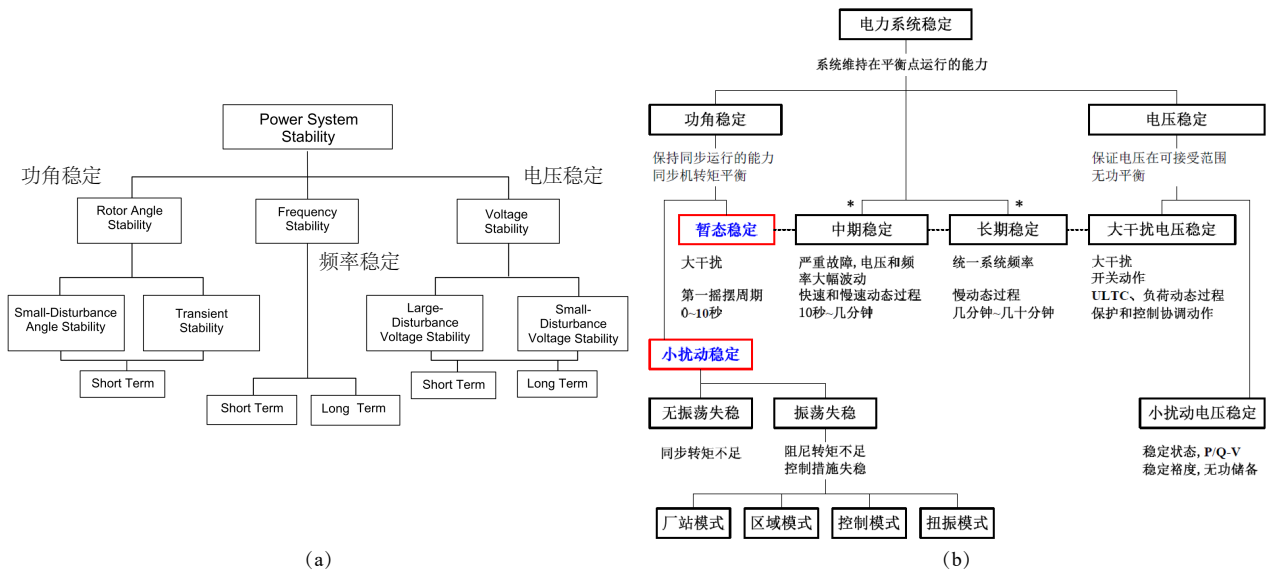


图 1: 电力系统稳定问题分类。(a)2004 年 IEEE/CIGRE 的分类标准 [5]。(b)1994 年 kundur 与 ower system stability and control 一书中的分类 [4].

暂态稳定仿真的意义在于，可以模拟电网中可能发生的扰动，通过仿真结果判断发生某种扰动后电网的稳定性，若电网不稳定，则可以进一步判断应采取何种故障清除措施，也就是产生先验知识。因此，在实际运行中，若发现电网产生了某种扰动，则可以根据仿真中产生的先验知识，及时采取相应的保护措施，防止电网变得不稳定。

对几千节点的电网，暂态稳定仿真时长通常设为 5-6s；对几万节点的电网，暂态稳定仿真时长通常设为 40s。

暂态稳定分析主要研究以下两个问题：

(1) 如何判稳？

目前已有许多论文尝试了多种自动判稳方法（SVM,DT,NN）等，但这些论文的训练数据均为暂稳仿真数据，仿真时长 5-6 秒。这个时间长度意味着，对于不能保持稳定的仿真样本而言，某些物理量的值已经起飞了，不稳定特征非常明显。因此完全能够通过简单的数值判定来判断样本是否不稳定（Section 2.1）。

因此，快速判稳（短时间内，比如 1S，完成判断）受到了广泛关注。分析人员希望在功角还没有飞之前做出判断，但是目前这种判断的正确率很低，即使是人工智能方法，判断的正确率也不高。（可以想象为什么人工智能方法准确率不会高，因为输入数据时间太短，不可能有描述稳定或不稳定的特征；但是如果增加仿真时间长度，就又没了用人工智能方法的必要。）

(2) 有哪些不同类型的不稳定模式，如何判别？

不稳定类型包括：功角不稳定、频率不稳定、电压不稳定。这三类不稳定没有子类，但是各自拥有很多不同的产生原因，对应着不同的解决方案。但是由于电力系统的复杂性，当电网表现为不稳定时，可能会包含多种不稳定类型，例如，同时表现为电压不稳定与频率不稳定。这种情况下，判断那种类型的不稳定占据主导地位，引起了另外几种，是重要的，但同时也非常困难，实际情况中依靠人工经验判断，具体情况具体分析。

这些不稳定类型的判别方式也比较直接。例如功角差不超过 180，系统最低母线电压标值不能低于一定值（如 0.7），系统最低频率不能低于一定值（如 45）。

## 2 传统的暂态稳定分析方法

目前，传统的评估暂态稳定的方法主要分为三种：数值解法、直接法和动态安全评估。我们的研究中只考虑数值解法，因为我们已经有了仿真提供的数值曲线，无须绕远路使用后两种方法。

## 2.1 数值解法（仿真）

数值解法即我们所说的仿真方法。该方法通过构建包含网内各元件参数的微分方程与代数方程，并通过欧拉、龙格库塔等数值计算方法求解，最终输出网内各元件在仿真时长内发生的电气量变化情况。

**判稳依据.**(华科 PPT) 任意两台发电机之间相对功角超过  $180^\circ$ ，则系统暂态失稳。

**例.**[1] 等文献依据基于功角的 transient stability index (TSI) 来判稳。TSI 为正时，系统稳定；为负，则系统不稳定。

$$TSI = \frac{360^\circ - |\delta_{max}|}{360^\circ + |\delta_{max}|},$$

其中， $\delta_{max}$  表示任意两台发电机之间的最大功角差。注意，TSI 针对小规模电网具有一定的计算优势，但对大规模电网的计算效率则较低。**这个例子的判稳方式与上述判稳依据矛盾，因为当两台发电机之间相对功角超过  $180^\circ$  时，TSI 也可能为正。实际情况中，以  $180^\circ$  为准。**

**仿真的缺陷.** (1) 随着电网的规模、复杂度的增加，仿真计算的效率会显著降低。(2) 暂态稳定分析往往针对短时间内的电网变化 (1s 内)，因此仿真难以支持 online 评估。(3) 无法对所有的故障做仿真。

**问题：**对仿真方法而言，判稳依据非常明确，感觉不需要使用基于数据挖掘/人工智能的方法。

## 2.2 直接法

直接法的代表为 Lyapunov 函数法，同时也包括暂态能量函数法、扩展等面积定则 (EEAC) 等方法。与仿真方法不同，直接法无需构造非线性方程组，而是通过计算系统的稳定边界来判稳。因此直接法的计算效率远高于仿真。

**直接法的缺陷.** 随着电网复杂度的增加，需要对直接法所使用的模型进行简化，从而会降低判稳准确率 [3, 10]。

## 2.3 动态安全评估

动态安全评估包括：事故集筛选、在线稳定分析、稳定裕度评估、动态稳定域等。

# 3 用于暂态稳定分析的人工智能方法

已有的人工智能方法主要面向判断电力系统是否暂态稳定，使用的方法包括，决策树 (Decision Tree) [1]，支持向量机 (Support Vevtor Machine) [6, 10, 9, 2, 8, 7]，神经网络 (Multi-Layer Perceptron [6]、PNN [1]、CNN [1]、RNN [1])。在数据集等基础条件相同时，经测试，神经网络的判稳准确率高于其他方法 [1]，但与所选择的神经网络类型、结构有关。目前，已发表的用于暂态稳定判稳的人工智能方法准确率均在 95 – 100%，准确率非常高（原因见 Section ??）。

## 3.1 数据集标记

暂态稳定分析通常通过暂态稳定仿真计算获得目标数据集。但是仿真计算得到的数据集不带有每个样本是否稳定的标记。根据华科和电科院的说法，可以根据任意两台发电机之间相对功角是否超过  $180^\circ$  来标记样本的稳定性；但在已有论文中，常用的标记方法为以下两种。

**Transient Stability Index (TSI).** TSI 通过发电机之间的功角差计算稳定性 (详见 Section 2.1) [1]。

**Critical Clearing Time (CCT).** CCT 根据故障的清除时间判断电力系统是否暂态稳定 [7]。系统若要维持稳定，那么所有故障的最大清除时间必须高于某个指定值，并有一定的安全时间裕度。通常情况下，指定的清除时间，由发生故障后继电器的响应时间和断路器的断路时间共同决定。

$$CCT(P, Q, v, \theta) \geq CCT_{min} + \varepsilon_0,$$

其中， $P, Q, V$  分别表示有功、无功、电压， $CCT_{min}$  表示指定清除时间， $\varepsilon_0$  表示安全裕度（在指定清除时间的基础上再多加几秒）。

表 1: 特征选择方法效果总结

方法	特征内容	网络规模 与样本数量 (母线 & 样本)	准确率	备注
无 [2]	原始时间序列: 1. 电压、功角、发电机转速 2. 各序列采 4-12 个时刻	1.39、492	1. 电压: 97-98% 2. 功角: 89-94% 3. 转速: 90-98%	准确率随时间序列 的采样率变化
人工 [9]	共 24 个特征: 1. 故障发生、清除时电气量值 2. 负荷、功角、转子速度、 转子加速度	1.39、4800 2.4K、50K 3.30K、56K	1. 样本 1: 93% 2. 样本 2: 95% 3. 样本 3: 99.9%	CVM 优于 SVM
CA [8] PCA [8]	1. 先相关性分析, 再 PCA 2. 分别提取 10、30 个特征: 发电机发电量和功角、 母线电压、线路有功无功 3. 归一化	1.39、6K 2.87、15K	1. 样本 1:98% 2. 样本 2:98-99%	1. 用了 SVM 与 NN 2. 数据量小特征选择 效果不明显 3. NN 特征选择效果不 明显, SVM 较明显

### 3.2 特征选择与提取

由 Section 1.3 知, 暂态稳定仿真计算的输出为电力系统中各个元件在一段时间内的各种电气量值的变化情况。因此, 对大规模电网, 若将暂稳计算的输出结果直接作为 AI 方法的输入, 特征维度将特别高, 所以通常需要在进行特征选择 (Selection) 与提取 (Extraction)。这两种方式的区别在于, 特征提取会对输入的特征进行变形后再降低特征数量, 而特征选择不会进行变形。

通常情况下, 可以仅选择一种特征选择方法或一种特征提取方法获得有效特征, 但也可在特征选择的基础上继续做特征提取, 从而进一步减少冗余特征的数量 [8]。表 1 总结了已有的特征选择方法的结果。

#### 3.2.1 特征选择

- 1. 不选择特征.** 规模特别小的数据集通常可以直接使用暂稳仿真计算输出的原始时间序列作为方法的训练输入。
- 2. 人工选择.** 根据暂稳仿真计算的故障类型, 人工选择某些最受影响的电气量作为特征。
- 3. 相关性分析 (Correlation Analysis).** 相关性分析通过计算 (1) 不同电气量或 (2) 不同元件的相同电气量之间的皮尔森相关性系数 (Pearson Correlation Coefficient), 去掉某些与其他电气量/元件具有高相关性的电气量/元件。

#### 3.2.2 特征提取

- 1. 主成分分析 (Principal Component Analysis).** 将仿真计算的输出数据组织为矩阵形式, 通过 PCA 计算其特征分解, 最后保留特征值较大的主成分。这种方法的主要问题在于, 如何选取主成分, 选取多少个主成分, [8] 中提出了三种主成分选取方法。

## 参考文献

- [1] Nicholas Gregory Baltas, Peyman Mazidi, Jin Ma, Francisco de Asis Fernandez, and Pedro Rodriguez. A comparative analysis of decision trees, support vector machines and artificial neural networks for on-line transient stability assessment. In *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pages 1–6. IEEE, 2018.

- [2] Francisco R Gomez, Athula D Rajapakse, Udaya D Annakkage, and Ioni T Fernando. Support vector machine-based algorithm for post-fault transient stability status prediction using synchronized measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3):1474–1483, 2011.
- [3] Luyu Ji, Junyong Wu, Yanzhen Zhou, and Liangliang Hao. Using trajectory clusters to define the most relevant features for transient stability prediction based on machine learning method. *Energies*, 9(11):898, 2016.
- [4] Prabha Kundur, Neal J Balu, and Mark G Lauby. *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York, 1994.
- [5] Prabha Kundur, John Paserba, Venkat Ajarapu, Göran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou, David Hill, Alex Stankovic, Carson Taylor, et al. Definition and classification of power system stability. *IEEE transactions on Power Systems*, 19(2):1387–1401, 2004.
- [6] LS Moulin, AP Alves Da Silva, MA El-Sharkawi, and Robert J Marks. Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2):818–825, 2004.
- [7] Huy Nguyen-Duc, Linh Tran-Hoai, and Huy Cao-Duc. An approach to solve transient stability-constrained optimal power flow problem using support vector machines. *Electric Power Components and Systems*, 45(6):624–632, 2017.
- [8] Noor Izzri Abdul Wahab, Azah Mohamed, and Aini Hussain. Feature selection and extraction methods for power systems transient stability assessment employing computational intelligence techniques. *Neural processing letters*, 35(1):81–102, 2012.
- [9] B. Wang, B. Fang, Y. Wang, H. Liu, and Y. Liu. Power system transient stability assessment based on big data and the core vector machine. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5):2561–2570, Sep. 2016.
- [10] Yanzhen Zhou, Junyong Wu, Zhihong Yu, Luyu Ji, and Liangliang Hao. A hierarchical method for transient stability prediction of power systems using the confidence of a svm-based ensemble classifier. *Energies*, 9(10):778, 2016.